

Biotecnologia no Melhoramento: Limites e Perspectivas



Capítulo 12

A biotecnologia pode ser descrita como um conjunto de ferramentas baseado nos avanços da biologia molecular e da engenharia genética, podendo ser aplicada para o melhoramento de cultivar de plantas. Entre essas ferramentas, há aquelas que levaram ao desenvolvimento das plantas transgênicas (ou Geneticamente Modificadas GMs). Estas têm tido mais visibilidade, devido à liberação comercial de cultivares, inclusive as de algodão. Ainda, outras técnicas têm sido aplicadas ao algodão na expectativa de aperfeiçoar ainda mais a qualidade e a produtividade de suas cultivares, como o uso de marcadores moleculares para seleção assistida de genótipos superiores.

As Plantas Transgênicas no Mundo

Os índices de adoção dos cultivos transgênicos vêm se acentuando consistentemente desde o seu início, em 1996. No período de 1996-2004, a área total de cultivos transgênicos teve aumento superior a 47 vezes, expandindo-se dos 1,7 milhões de hectares iniciais, em 1996, para 81 milhões de hectares, em 2004. Um total de 17 países, seis industrializados e 11 em desenvolvimento, cultivam essas plantas sendo que os principais são:

- Estados Unidos, com 47,6 milhões de hectares (59% do total global);
- Argentina, com 16,2 milhões (20%);
- Canadá, com 5,4 milhões (6%);
- Brasil, com 5,0 milhões (6%);
- China, com 3,7 milhões (5%);
- Paraguai, com 1,2 milhão (2%);
- Índia, com 0,5 milhões de hectares (1%).

Colaborou:

Osmundo Brilhante Oliveira-Neto

PhD em Biologia Molecular, atualmente
lotado na Embrapa Cenargen e
Biotecnologia com Pós-doc.

Maria Fátima Grossi de Sá
fatimasa@cenargen.embrapa.br



Formada em Ciências Biológicas pela Universidade de Brasília. Com mestrado e doutorado na área de Biologia Molecular pela Universidade de Brasília e Université Paris VII-França. Atualmente pesquisadora da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, onde desenvolve pesquisa na área de engenharia genética de plantas.

Marc Giband
giband@cnpa.embrapa.br



Possui graduação, mestrado e doutorado em Biologia Molecular e Celular, sendo que as duas últimas titulações foram obtidas pela Université Louis Pasteur, na França. Pesquisador do Cirad, atualmente lotado na Embrapa Algodão, onde desenvolve pesquisa na área de mapeamento genético de resistência para doenças do algodão.

As culturas transgênicas com maiores áreas cultivadas no mundo são a soja, o milho, o algodão e a canola, e todas vêm demonstrando aumentos expressivos de área cultivada. A soja GM foi cultivada, em 2004, em 48,4 milhões de hectares (60% da área total com lavouras transgênicas), mais do que os 41,4 milhões de hectares registrados no ano anterior. Também em 2004, o milho GM foi plantado em 19,3 milhões de hectares (23% da área total com transgênicos), contra os 15,5 milhões de 2003. Já a canola GM ocupou 4,3 milhões de hectares (6% da área total com transgênicos), contra os 3,6 milhões de 2003.

O número de agricultores que adotam a produção de transgênicos é extremamente expressivo, tendo alcançado, no final de 2004, aproximadamente, 8,25 milhões. Ao contrário do que normalmente se imagina, a maior parte desses produtores - cerca de 7,4 milhões (90% do total) -, são de pequeno porte, principalmente, no caso de cotonicultores chineses^{1,2}. O algodão, além de ser a cultura GM que contribui com o maior número de agricultores no mundo, é uma das que ocupa as maiores áreas.

Os Algodoeiros Transgênicos no Mundo

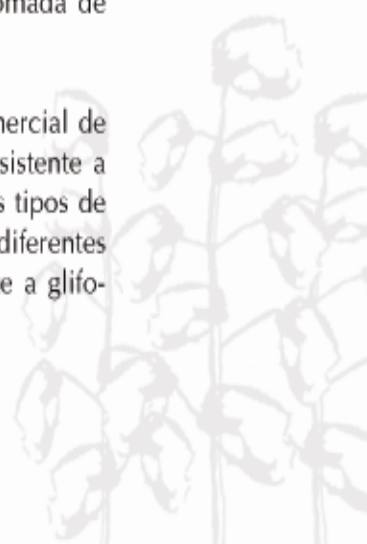
O algodoeiro tem sido uma das culturas que mais tem se beneficiado com os avanços da biotecnologia. De fato, cultivares de algodão geneticamente modificado foram comercialmente liberadas já em 1996, nos Estados Unidos, Austrália e México. Durante esta última década, o número de países que adotaram as cultivares GM de algodão e a superfície dedicada a estas cultivares cresceram rapidamente. Em 1996, eram três países em uma área de 0,8 milhões de hectares. Em 2004, este número já era de oito países (USA, Austrália, México, Argentina, Colômbia, Índia, África do Sul e RP da China) e de 9 milhões de hectares. Este último número corresponde a, aproximadamente, 28% dos 32 milhões de hectares de algodão cultivados mundialmente em 2004².

A ampla aceitação desta tecnologia pelos agricultores é resultante de uma série de benefícios sociais, ambientais e econômicos, sendo estes cruciais para a tomada de decisão de utilizar ou não a tecnologia de plantas GM.

Em 1996, nos Estados Unidos e na Austrália, se deu o início do cultivo comercial de algodão transgênico pela introdução do algodão *Bt* (um tipo de algodão resistente a insetos) da empresa Monsanto, chamado de Bollgard. Posteriormente, outros tipos de algodões transgênicos, com resistência a insetos e tolerância a herbicidas de diferentes empresas, foram surgindo, entre estes, o algodão RR da Monsanto (tolerante a glifo-

¹ JAMES, 2002.

² JAMES, 2004.



sato), LibertyLink da Bayer (tolerante ao glufosinato de amônia), o VIP (resistente a insetos) da Syngenta, entre outros. A tabela I mostra uma lista dos principais eventos comercializados mundialmente.

As características que têm sido conferidas às cultivares transgênicas incluem resistência aos insetos, tolerância aos herbicidas e uma combinação de ambas as características. Dos 9 milhões de hectares dedicados às cultivares transgênicas, 4,5 milhões (50%) são de cultivares resistentes a insetos, 1,5 milhões (16%) de tolerantes a herbicidas, enquanto que, os 3 milhões restantes (33%) são dedicados às cultivares combinando estas duas características³.

Os índices de adoção das cultivares de algodão GM variam de um país a outro e podem alcançar índices tão altos quanto 85% das superfícies cultivadas na África do Sul, 80% na Austrália, 75% nos Estados Unidos (variando de 50% a 90%, dependendo do estado) e 66% na RP da China. Na Índia, último país a adotar as cultivares GM, as áreas dedicadas ao algodão transgênico representavam apenas 6% do total do algodão cultivado. Mas, nos últimos dois anos, essas áreas têm-se multiplicado por 9 (50.000 hectares em 2002 para 460.000 hectares em 2004).

Tabela 1: Lista dos principais tipos de algodão GM comercializados no mundo.

Evento	Gene	Característica	Companhia	Ano comercialização
Bollgard	<i>cry1Ac</i>	resistência a insetos Algodão <i>Bt</i>	Monsanto	1996
Bollgard II	<i>cry1Ac + cry2Ab</i>	resistência a insetos Algodão <i>Bt</i>	Monsanto	2003
WideStrike	<i>cry1Ac + cry1F</i>	resistência a insetos	Dow AgroSciences	2005
VipCot	<i>Vip3A</i>	resistência a insetos	Syngenta	2004
RoundUp Ready (RR)	<i>CP4 epsps</i>	tolerância ao herbicida glifosato (fase vegetativa)	Monsanto	1996
RoundUp Ready Flex	<i>CP4 epsps</i>	tolerância ao herbicida glifosato (fase vegetativa e reprodutiva)	Monsanto	2005
LibertyLink	<i>Bar</i>	tolerância ao herbicida glufosinato de amônia	Bayer CropScience	2005
<i>Bt</i> /CpTI cotton	<i>cry1Ac/cry1Ab + cpti</i>	resistência a insetos	Setor Público da China	1997

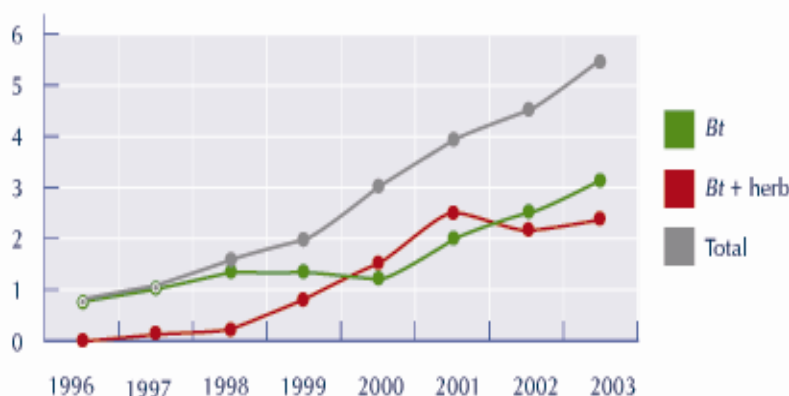
³ JAMES, 2004.

Dessa forma, nos últimos três anos o algodão foi a cultura GM que demonstrou o maior percentual de crescimento: 25% em 2004, 25% em 2003 e 27% em 2002. Em 2005 e nos próximos anos, espera-se que a área de algodão GM continue a demonstrar um forte crescimento, tendo em vista que Índia e China continuam incrementando a área plantada e novos países estão introduzindo essa lavoura pela primeira vez. (Figura 1)

A China é, de longe, o país que tem o maior número de agricultores que utilizam algodão transgênico. Mas, ao contrário dos outros países, os chineses possuem algodão GM desenvolvido a partir de pesquisas financiadas pelo Estado, o que permite que as sementes sejam ofertadas a preços significativamente reduzidos em relação aos das multinacionais⁴.

Os resultados dos benefícios econômicos proporcionados pela utilização destas cultivares, assim como a procura por sistemas de produção mais competitivos, têm levado a uma rápida e extensiva adoção das cultivares transgênicas pelos produtores de algodão. Apesar do grande sucesso das cultivares transgênicas, eliminar alguns dos obstáculos que ainda retardam uma maior difusão e utilização destas cultivares irá, sem dúvida, permitir que um maior número de produtores se beneficiem do seu potencial.

Figura 1: Adoção de algodão transgênico no mundo em milhões de hectares. *Bt*: cultivares de algodão *Bt* (resistentes a insetos). *Bt* + herb: cultivares de algodão *Bt* e herbicidas (resistência a insetos e herbicidas na mesma planta). Repare que as cultivares que são somente resistentes a herbicidas não estão contabilizadas e, portanto, o tamanho da área plantada real é ainda maior que a demonstrada no gráfico.



Fonte: JAMES, 2004

⁴ HUANG, 2002.

Benefícios e Segurança do Algodão Transgênico

Apesar das variações significativas que ocorrem de um país ao outro e, ao longo dos anos, aqueles que adotaram as cultivares GM têm, de maneira geral, se beneficiado economicamente e ambientalmente. As cultivares resistentes a insetos tem permitido uma redução no uso de pesticidas, assim como um aumento visível da renda líquida. As cultivares tolerantes a herbicidas têm também proporcionado reduções nos custos de produção⁵.

De forma geral, todos os países que introduziram o algodão *Bt* têm obtido benefícios econômicos, sociais e ambientais. Estes são decorrentes, em parte, do aumento de produtividade e, principalmente, da redução de, pelo menos, 50% no uso de inseticidas. Em 2001, nos Estados Unidos, o uso do algodão *Bt* resultou em aumentos de produtividade que correspondem a 84 milhões de quilos, e permitiu uma redução do uso de 0,9 milhões de quilos de inseticidas (ingrediente ativo). Isto resultou em ganhos para o produtor americano de 50 dólares por hectare, correspondendo a um benefício líquido total de 103 milhões de dólares⁶.

No entanto, o diferencial do desenvolvimento de cultivares GMs nacionais trouxe resultados consideravelmente melhores aos produtores de algodão da China. Também em 2001, os ganhos econômicos dos cotonicultores chineses foram muito superiores aos dos americanos: 500 dólares por hectare, um benefício global de 750 milhões de dólares. A expressiva diferença dos ganhos financeiros entre os agricultores da China e dos Estados Unidos (500 dólares / hectare na China contra 50 dólares / hectare nos EUA) se deve, principalmente, ao fato de que os preços das sementes transgênicas na China são muito inferiores aos praticados nos Estados Unidos⁷.

Como consequência da redução drástica do uso de inseticidas, o número de agricultores intoxicados foi reduzido em até 75%. Este impacto benéfico à saúde humana foi observado na China, onde a pulverização de inseticidas é realizada, principalmente, de forma manual e, conseqüentemente, a redução do volume de inseticidas tem uma relação quase direta com a redução da exposição dos agricultores aos agrotóxicos. A tabela 2 demonstra a redução do volume de inseticidas ocorrido na China como consequência do uso de algodão *Bt*.

Tipo de Algodão	1999	2000	2001	Média
Não transgênico	60,7	48,5	87,5	65,5
transgênico (<i>Bt</i>)	11,8	20,5	32,9	21,7
% de redução	80,6%	58%	62%	67%

Tabela 2: Redução do volume de inseticidas utilizados no algodão no período de 1999 a 2001 na China.

Fonte: PRAY, 2002

⁵ ICAC, 2004.

⁶ JAMES, 2002.

⁷ HUANG, 2002; FAO, 2004

No Brasil, a partir de 2007, o produtor deve contar com cultivares de algodão transgênicas resistentes a lagartas (Bollgard®). A tecnologia Bollgard possibilita o controle das lagartas: *Pectinophora gossypiella*, *Alabama argillacea* e *Heliothis virescens*. Entretanto, não são eficientes no controle da *Spodoptera sp.* e da *Pseudoplusia includens* (falsa medideira). No entanto, esta tecnologia (Bollgard®) não é capaz de controlar uma das principais pragas da cultura no Brasil, o bicudo-do-algodoeiro. Como consequência, espera-se que o uso de cultivares Bollgard possibilite a redução de inseticidas, mas não de uma forma drástica, devido ao número de aplicações que ainda serão necessárias.

Dessa forma, outros genes de resistência às principais pragas que afetam o algodão no país, incluindo o bicudo-do-algodoeiro, vêm sendo estudados pela Embrapa, em associação com o setor produtivo. Esta tecnologia, quando obtida, possivelmente permitirá uma significativa redução de custos e aumento da competitividade da cotonicultura nacional.

O meio ambiente também se beneficia da redução maciça de defensivos agrícolas. Segundo a FAO, o uso do algodão GM tem demonstrado um forte impacto ambiental positivo resultando em redução significativa da contaminação de fontes de água e menor impacto a insetos benéficos (FAO, 2004).

As vantagens geradas aos produtores pelo uso de cultivares transgênicas tendem a crescer juntamente com a experiência adquirida ao longo dos anos de produção. No entanto, certa cautela deve ser adotada para que as vantagens adquiridas não sejam extrapoladas de um país ou área para a outra. De fato, muitas variáveis, tais como a ocorrência e a pressão de pragas e doenças, a adaptação das cultivares às condições locais e aos sistemas de cultivo, etc., vão influenciar diretamente a equação custo/benefício, que deve ser avaliada de acordo com as condições locais.

É importante ressaltar ainda que todos os produtos transgênicos que são comercializados no mundo passaram por rigorosas avaliações de segurança ambiental e alimentar antes de serem liberados. De fato, a FAO, a Organização Mundial de Saúde, as academias de ciências do Brasil, China, Estados Unidos, Índia, Itália, México, Terceiro Mundo, entre outras renomadas instituições científicas, atestam que os produtos GM que já são comercializados são tão seguros quanto os convencionais⁸.

⁸ WHO, 2002; FAO, 2004; ICSU, 2003



Limites das Cultivares Atuais

Até recentemente, as características das cultivares GMs comercialmente disponíveis eram limitadas. Com relação às cultivares tolerantes a herbicidas, somente as tolerantes ao glifosato (RoundUp Ready®) eram disponíveis no mercado, enquanto que, para resistência a insetos, somente as cultivares Bollgard®, resistentes às lagartas curuquerê, lagarta-da-maçã ou a lagarta-rosada, foram liberadas. Estas últimas não são resistentes a algumas pragas importantes, tais como a lagarta-militar, o bicudo-do-algodoeiro, e ainda aos ácaros, percevejos e pulgões. Esta deficiência, de certa maneira, torna relativa a utilidade destas cultivares em algumas regiões e áreas do mundo.

Recentemente, a introdução de novos eventos tem permitido uma ampliação mais significativa da gama de herbicidas utilizáveis (cultivares Liberty Link®, tolerante ao herbicida glufosinato de amônia), assim como o crescimento do número de insetos controlados por cultivares GM mais recentes (cultivares Bollgard II®, WideStrike® ou VipCot®, resistentes às mesmas lagartas que as cultivares Bollgard®, e ainda às lagartas-militares).

Estas novas cultivares não vão somente permitir um melhor controle das pragas e/ou um melhor gerenciamento da resistência das ervas daninhas aos herbicidas (por meio do uso de rotações entre as diferentes cultivares tolerantes a herbicidas), mas irão também introduzir uma competição no mercado de sementes geneticamente modificadas.

O fato de as cultivares transgênicas serem sujeitas a patente (como o são também a maioria dos processos e genes utilizados para a obtenção destas cultivares) tem limitado bastante o número de instituições ou companhias capazes de liberá-las no mercado. Este fator poderia impedir, ou pelo menos dificultar, o desenvolvimento e a liberação de cultivares GMs locais, que têm como objetivo o controle de pragas ausentes ou consideradas como secundárias, porém, com real importância econômica para os sistemas locais de produção de algodão.

A única exceção notável ao monopólio das grandes companhias multinacionais no mercado do algodão GM encontra-se na RP da China. De fato, este é o único caso onde cultivares GM desenvolvidas pelo setor público (Academia Chinesa de Ciências e Agricultura – CAAS) e vendidas por companhias locais de sementes que adquiriram direitos legais, co-existem com cultivares desenvolvidas pelo setor privado estrangeiro. O sistema dos chineses poderia ser o procedimento a ser adaptado por outros países para que estes possam também desenvolver e comercializar cultivares nacionalmente produzidas. Os estudos na China contaram com um alto nível de financiamento público e resultaram no desenvolvimento de tecnologias próprias, inclusive de transformação do algodoeiro.

Perspectiva de uso de Algodão Transgênico no Brasil

O órgão responsável pelas liberações comerciais de transgênicos no país, a CTNBio, autorizou, em 2005, o evento Bollgard da empresa Monsanto, que deverá estar disponível para o agricultor em 2006. A partir desta liberação, é esperado que as outras cultivares de algodão transgênico também sejam liberadas. Um recente estudo realizado por Freire estimou a redução de custos que o produtor brasileiro teria pela adoção de diferentes tipos de algodão transgênico. Basicamente, o estudo considerou a redução de custos, caso o preço da semente transgênica, que apresente resistência a insetos e tolerância a herbicidas, custasse 60 dólares por hectare a mais do que o valor da semente não-transgênica (convencional).

É importante esclarecer que a redução de custos estimada por este estudo só é válida se as plantas transgênicas forem oriundas de cultivares resistentes a viroses. Isto se dá pelo fato de que os inseticidas utilizados para o controle de lagartas também atuam no controle dos vetores que transmitem as viroses. Portanto, se a tecnologia de plantas GM resistentes a insetos for aplicada em cultivares suscetíveis a vírus, o agricultor continuará tendo que aplicar inseticida para o controle de viroses.

Neste estudo, Freire estima que o algodão transgênico venha a ocupar, em 2 a 3 anos, 62% da área plantada, o que resultaria na economia de 1.436.064 litros de herbicidas, e de 5.640.180 litros de inseticidas. Se a taxa tecnológica (aumento do preço da semente) for, de fato, 60 dólares por hectare, isto resultaria em uma economia média de US\$123.00/ha, o que corresponde a redução de 10,2% nos custos de produção e em um benefício líquido aos produtores de algodão de US\$ 83.372.000. 00. (Tabela 3)⁹.

No entanto, o valor da taxa tecnológica que será adotado é imprevisível. Se o preço da semente transgênica for muito superior ao da semente convencional, não haverá interesse do agricultor em adotar esta tecnologia. Além disto, a Embrapa poderá licenciar a tecnologia, sem exclusividade, a todos os programas de melhoramento interessados para incorporação em suas cultivares. Deste modo, garantindo o direito dos produtores em escolher as cultivares que desejam plantar sem limitar as suas opções à cultivares de uma ou poucas empresas.

Muitas patentes, na grande maioria controladas pelas companhias multinacionais de biotecnologia, estão vinculadas ao desenvolvimento de cultivares transgênicas. Estas patentes abrangem quase todos os aspectos do desenvolvimento de plantas GM, desde os sistemas de transformação do algodoeiro, utilizando a bactéria *Agrobacterium tumefaciens* (a mais comumente utilizada nos sistemas de transformação do algodoeiro)

⁹ FREIRE, 2004

até os genes que conferem os caracteres às plantas (tolerância a herbicidas ou resistentes a insetos, e outras características).

Algumas instituições têm tentado desenvolver estratégias alternativas a fim de contornar essas patentes que controlam processos-chaves da transformação. Como mencionado anteriormente, a CAAS (Chinese Academy of Agricultural Sciences- China) desenvolveu um sistema alternativo de transformação do algodoeiro (transformação através do "pollen-tube pathway") e que permitiu contornar esses obstáculos.

Da mesma maneira, CAMBIA¹⁰, um instituto de pesquisa sem fins lucrativos na Austrália, desenvolveu um sistema de transformação de planta independente daquele baseado na *A. tumefaciens*¹¹. Apesar de ainda não ter sido testado no algodoeiro, esta técnica inovadora de transformação poderá, igualmente, permitir que institutos de pesquisa contornem os obstáculos referentes a certas patentes.

Tabela 3: Estimativa de redução de insumos e de custos advindos da utilização de algodão transgênico no Brasil.

Tipo de algodão transgênico	Redução do Consumo de Herbicida a l/ha	Redução do Consumo de Inseticida a l/ha	Taxa tecnológica estimada US\$/ha	Redução do Custo total pelo uso da Tecnologia GM- US\$/ha
Cultivar sensível à virose + gene RR da Monsanto (tolerância ao glifosato)	2	-	14.00	36.00
Cultivar resistente à virose + gene RR da Monsanto (tolerância ao glifosato)	2	10	14.00	146.00
Cultivar resistente à virose + genes RR e BG1 da Monsanto (tolerância ao glifosato e resistência a lagartas)	2	14	60.00	170.00
Cultivar resistente à virose + genes da Embrapa (tolerância ao glifosato, resistência a lagartas e bicudo)	2	21,5	30.00	245.00

Fonte : Adaptado de Freire, 2004.

Repare que a estimativa de redução de custos pelo uso do algodão transgênico, com genes disponíveis atualmente, é baseada em uma taxa tecnológica (custo adicional da semente transgênica) de 60 dólares/hectare. No caso de o preço da semente transgênica ser superior, o benefício econômico será proporcionalmente reduzido. Por outro lado, quando lançado, o preço do gene (tecnologia) da Embrapa será significativamente inferior ao das multinacionais do setor, podendo não ultrapassar 30 dólares/hectare. O gene da Embrapa possibilitará ainda uma redução de custos de 45 dólares por hectare pela redução de inseticidas utilizados para o controle do bicudo-do-algodoeiro.

Obs: a redução de custos foi calculada considerando:

- 1- Redução no custo por adoção de cultivar resistente a virose – US\$110.00
- 2- Redução no custo do controle de lagartas – US\$70.00
- 3- Redução no custo do controle do bicudo – US\$45.00
- 4- Redução no custo do controle de ervas daninhas – US\$50.00

¹⁰ <http://www.cambia.org>

¹¹ BROOHAERTS, 2005

Iniciativas visando as necessidades locais têm sido tomadas pelas instituições do setor público de alguns países produtores de algodão, como a Índia, a República Popular da China, o Paquistão e o Brasil. Essas iniciativas visam, principalmente, o desenvolvimento de cultivares GM locais, especialmente as resistentes aos insetos. Só o tempo dirá se todos estes esforços e iniciativas serão coroados de sucesso, como foi a iniciativa do CAAS na RP da China.

A expectativa é que a engenharia genética beneficie avanços na cotonicultura não só na tolerância a herbicidas e resistência a insetos. Provavelmente, num futuro mais distante, novas cultivares de algodão GM - com resistência a outros estresses bióticos e abióticos, ou cultivares com qualidade de sementes e de fibras melhoradas - serão introduzidas no mercado. De fato, esforços têm sido feitos para identificar os genes envolvidos no desenvolvimento das fibras de algodão e para compreender a sua função na elaboração da qualidade¹², ou ainda desenvolver cultivares com óleo de caroço modificado¹³.

No Brasil, algumas instituições pesquisam o desenvolvimento de algodão transgênico nacional. Uma série de projetos vem sendo desenvolvida pelos centros de pesquisa da Embrapa. Entre eles, destacam-se o isolamento de genes para inibidores de enzimas hidrolíticas e de toxinas *Bt*, a obtenção de genes para variantes de toxinas *Cry* e inibidores de proteinases, por meio do uso de técnicas de evolução molecular *in vitro*, transformação de algodão e o de isolamento do gene de colesterol oxidase¹⁴.

A partir do financiamento destes projetos, resultados bastante promissores na direção da obtenção de cultivares GM resistentes as principais pragas da cultura no Brasil já foram alcançados. A principal fase, a de isolamento de genes que conferem resistência aos insetos-praga, incluindo o bicudo-do-algodoeiro, já foi concluída. Esta etapa é crucial, pois permite o patenteamento dos genes e o conseqüente oferecimento de cultivares de algodão transgênicos por preços acessíveis aos produtores brasileiros e, significativamente, menores do que os oferecidos pelas multinacionais de biotecnologia. Outra etapa que vem sendo alcançada com êxito é o sistema de transformação de plantas de algodão. Experimentos de transformação com cultivares brasileiras de algodão estão sendo realizados pela Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, nos quais estão sendo introduzidos genes para proteínas com atividade para o bicudo-do-algodoeiro e para as lagartas (Figura 2).

Estes são apenas alguns exemplos do que poderá ser alcançado por meio da aplicação dos conhecimentos e das técnicas relativas à biotecnologia e à engenharia genética. Apesar de as possibilidades da engenharia genética serem, algumas vezes, apresentadas como limitadas apenas pela imaginação dos pesquisadores, é bem provável que

¹² ARPAT, 2004 ; WILKINS E ARPAT, 2005 ; LI, 2004

¹³ LIU, 2002

¹⁴ MAGALHÃES, 2002; MAGALHÃES, 2004a; MAGALHÃES 2004b, OLIVEIRA NETO, 2005.

somente os produtos que apresentarem benefícios econômicos a ambos (aos criadores da tecnologia e aos produtores) consigam se inserir no mercado.

Quaisquer que sejam as características conferidas a uma cultivar pela engenharia genética, o seu valor será efetivado somente se a base genética (a própria cultivar) for de qualidade e adaptada às condições locais (características agrônômicas, resistência a doenças, etc.). Neste sentido, outras ferramentas da biotecnologia, como os marcadores moleculares, poderão também auxiliar melhoristas na seleção de cultivares.

Figura 2: Experimento de obtenção de plantas de algodão transgênicas realizado nas dependências da Embrapa Cenargen.



Outras Ferramentas da Biotecnologia: os Marcadores Moleculares

Se as cultivares GM são os produtos mais visíveis da biotecnologia, outras (bio) tecnologias têm também o potencial para melhorar a eficiência do melhoramento do algodoeiro. Entre elas, o uso de seleção assistida por marcadores moleculares (SAM).

Tradicionalmente, melhoristas têm contado com a avaliação dos caracteres “visíveis” mensuráveis (tamanho ou forma da planta, rendimento, qualidade da fibra, reação à inoculação de doenças, etc.) para selecionar linhagens de plantas melhoradas. Este tipo de seleção pode, algumas vezes, tornar-se difícil, onerosa e ainda demorada. Por exemplo, ao selecionar para resistência a doenças, melhoristas devem se certificar de que estas plantas tenham tido contato com o organismo causador da doença. Este não é sempre o caso, pois, de maneira geral, os melhoristas são obrigados a contar apenas com as infestações naturais, pois inoculações controladas seriam impossíveis ou muito dispendiosas. Assim sendo, algumas plantas poderiam escapar à inoculação e poderiam, erroneamente, serem consideradas e selecionadas como resistentes à doença.

Em oposição aos caracteres “visíveis”, que são comumente utilizados pelos melhoristas, marcadores moleculares são baseados no DNA, ou seja, no patrimônio genético da planta. Sendo assim, a seleção usando estes marcadores poderá ser feita antes que o caractere “visível” tenha se manifestado e mesmo sem que ele se manifeste. Por exemplo, se o marcador molecular estiver ligado à resistência a uma determinada doença, ele poderá ser usado na seleção daquelas plantas que trazem em seu patrimônio genético este caractere, sem ter que expor as mesmas à doença ou observar suas reações. Assim, o uso de marcadores moleculares na seleção de plantas (seleção assistida por marcadores) permite ao melhorista uma maior precisão em seu trabalho, e pode ainda acelerar o processo de seleção ao permitir uma escolha antecipada das plantas a selecionar para o esquema de cultivo.

Pesquisas sobre a identificação de marcadores moleculares ligados à resistência a algumas das principais doenças do algodoeiro têm sido realizadas em várias partes do mundo. Resultados preliminares incluem a identificação de marcadores ligados à mancha angular¹⁵, ou à murcha de *Verticillium*¹⁶; marcadores associados à resistência ao nematóide das galhas têm sido igualmente identificados¹⁷. Várias instituições públicas e privadas (Embrapa, Coodetec, Iapar) têm realizado projetos visando a identificação de marcadores ligados à resistência a outras doenças no Brasil (ramulária - ou mancha-branca, e doença azul - ou mosaico das nervuras). Esse trabalho está, no entanto, em

¹⁵ WRIGHT, 1998.

¹⁶ BOLEK, 2005.

¹⁷ BEZAWADA, 2003; HINCHLIFFE, 2005.

andamento, e esses estudos deverão proporcionar ao melhorista novas ferramentas, permitindo assim uma maior eficiência na seleção de cultivares com resistência a algumas doenças importantes para a cotonicultura no Brasil.

Esses estudos são baseados na análise da reação à inoculação de uma doença (“fenotipagem”) de uma população de plantas descendentes de um cruzamento entre pais que mostram uma reação contrastante (ou seja, que mostram reações diferentes - sensibilidade ou resistência - à doença). O que se procura são marcas que estejam ligadas a genes de resistência à doença (“genotipagem”).

Historicamente, por causa da sua importância econômica, a qualidade da fibra foi o primeiro alvo dos trabalhos usando marcadores moleculares. Assim, foram identificadas as marcas associadas a diversos componentes de importância econômica da qualidade da pluma, como o comprimento, a resistência, a elongação e o índice de *micronaire*¹⁸. Esses trabalhos demonstram também que a genética dos caracteres de qualidade da pluma é muito complexa, e que muitos genes estão implicados na definição das mesmas. Por causa disso, atualmente, o uso dessa técnica não é a mais indicada para o melhoramento da qualidade da fibra.

Mesmo que os exemplos das aplicações dos marcadores moleculares no algodoeiro ainda sejam poucos, essa tecnologia tem um potencial de uso não só na área do melhoramento, mas também nos estudos genéticos e na caracterização e conservação de populações naturais e de coleções de germoplasma. Como exemplo, podemos citar a detecção de duplicidades, análise de pureza e de diversidade genética, construção de mapas, fluxo gênico e estudos de caracteres quantitativos. No caso do uso de marcadores para fluxo gênico e diversidade genética podemos citar a pesquisa desenvolvida pela Embrapa Algodão que visa gerar informações que serão importantes para a liberação do uso de cultivares de algodão geneticamente modificado.

Considerações Finais

As biotecnologias têm tido um grande impacto na produção mundial de algodão, pelo uso difundido de cultivares GMs tolerantes a herbicidas e/ou resistentes a lagartas. A tendência de utilização destas cultivares aumentará na medida em que um maior número de países permitirão a sua comercialização.

¹⁸ LACAPE, 2005; LIN, 2005; SHEN, 2005.

Iniciativas contínuas na área de pesquisa, em ambos os setores público e privado, conduzirão ao desenvolvimento de novas cultivares com característica aperfeiçoadas. Ainda assim, em decorrência dos vários obstáculos (o que inclui, não somente os direitos de propriedade intelectual – patentes -, mas também as despesas de desenvolvimento e comercialização, inclusive assuntos relacionados à biossegurança) -, é bem provável que o mercado das cultivares geneticamente modificadas seja dominado por companhias do setor privado. Este tende, de maneira geral, a se inserir somente naqueles segmentos do mercado que lhes garantam um retorno econômico. Neste caso, algumas necessidades locais serão provavelmente desconsideradas.

Conseqüentemente, caberá às instituições locais o desenvolvimento de cultivares adaptadas às necessidades locais e à distribuição das mesmas por meio de soluções inovadoras ou em negociações com as entidades detentoras das patentes. Tecnicamente, um grande número de instituições do setor público mundial tem capacidade para desenvolver suas próprias cultivares geneticamente modificadas. O desafio dependerá da habilidade de cada uma em proporcionar que essas cultivares sejam comercializadas de modo a gerarem benefício aos produtores de algodão.

Outros domínios da biotecnologia estão recebendo grande atenção, tais como a identificação de novos genes do próprio algodoeiro, ou de espécies não relacionadas, ou ainda o desenvolvimento de ferramentas inovadoras de melhoramento. Qual será o impacto destas técnicas no melhoramento do algodão é algo que somente o tempo poderá confirmar.

O desenvolvimento e implementação das ferramentas da biotecnologia visando o melhoramento do algodão não deverão, no entanto, ocultar dois importantes aspectos:

- 1) para se beneficiar amplamente e longamente dos benefícios proporcionados por estas cultivares de ponta, os produtores deverão administrá-las adequadamente.
- 2) a biotecnologia não vai substituir o melhoramento convencional. O desenvolvimento de cultivares produtivas localmente adaptadas e de práticas culturais que aperfeiçoam o potencial destas cultivares continuarão tendo importância capital no processo de melhoramento do algodão.

Literatura Consultada

ARPAT, A.B. et al. Functional genomics of cell elongation in developing cotton. **Plant Molecular Biology**, v.54, p. 911-929, 2004.

BEZAWADA, C. et al. SSR marker(s) associated with root-knot nematode resistance gene(s) in cotton. **Journal of Cotton Science**, v. 7, p.179-184, 2003.

BOLEK, Y. et al. Mapping of verticillium wilt resistance genes in cotton. **Plant Science**, v.168, p. 1581-1590, 2005.

BROOThAERTS, W. et al. Gene transfer to plants by diverse species of bacteria. **Nature**, v. 433, p. 629-633, 2005.

FAO. **The state of food and agriculture 2003–2004**. Agricultural Biotechnology: Meeting the needs of the poor? Food and Agriculture Organization. Rome: [s.n.], 2004. Disponível em: < <http://www.fao.org/DOCREP/006/Y5160E/Y5160E00.HTM> >. Acesso em 15 jun. 2004.

FREIRE, E. C. **Cotonicultura no Brasil**: uma análise prospectiva da adoção da biotecnologia moderna para o setor produtivo de algodão. [S.l.: n.s.], 2005.

HINCHLIFFE, D. J. et al. Resistance gene analogue markers are mapped to homeologous chromosomes in cultivated tetraploid cotton. **Theoretical and Applied Genetics**, v.110, p. 1074-1085, 2005.

HUANG, J.; HU, R; FAN, C. Bt cotton benefits, costs, and impacts in China, **AgBioForum**, v.5, p.153-166, 2002.

ICAC. **Global status and impacts of biotech cotton**: Report of the second expert panel on biotechnology of cotton. Washington: ICAC, 2004.

ICSU. **New genetics, food and agriculture**: scientific discoveries, societal dilemmas. Paris: [s.n.], [200-?]. Disponível em: <<http://www.icsu.org>>. Acesso em 15 jun.2004.

JAMES C. **Global Review of Commercialized Transgenic Crops**: 2001, Feature: Bt Cotton. ISAAA Briefs, Ithaca, 2006. Disponível em: < <http://www.isaaa.org/home.htm> > Acesso em: 09 jan. 2006.

_____. **Global Status of Commercialized Transgenic Crops**: 2002. ISAAA Briefs, Ithaca, n.27, 2002. Disponível em: < "<http://www.isaaa.org/home.htm>"HYPERLINK "<http://www.isaaa.org/home.htm>"<http://www.isaaa.org/home.htm> >. Acesso em: 09 jan. 2006.

§_____. **Global Status of Commercialized Transgenic Crops**: 2004. ISAAA Briefs, Ithaca, n. 32, 2004. Disponível em: <"<http://www.isaaa.org/home.htm>"<http://www.isaaa.org/home.htm> > Acesso em: 09 jan. 2006.

LI, X. et al. Improvement of cotton fiber quality by transforming the *acsA* and *acsB* genes into *Gossypium hirsutum* L. by means of vacuum infiltration. **Plant Cell Reports**, v.22, p.691-697, 2004.

LIU, Q.; SINGH, S.; GREEN, A. High-oleic and high stearic cottonseed oils: nutritionally improved cooking oils developed using gene silencing. **Journal of the American College of Nutrition**, v. 21, p. 205S-211S, 2002.

MAGALHÃES, M.T.Q. et al. Caracterização bioquímica e clonagem de genes cry de uma estirpe de *Bacillus thuringiensis* efetiva contra o bicudo-do-algodoeiro (*Anthonomus grandis*). ENCONTRO DO TALENTO ESTUDANTIL, 7., 2002. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2002. p. 34.

_____. et al. Isolamento de genes *Bacillus thuringiensis* com potencial uso no controle das pragas do algodoeiro. WORKSHOP DE INTERAÇÃO MOLECULAR PLANTAS-PRAGA, 1., 2004. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004a. p.37-41.

_____. et al. Isolamento de genes cry com potencial uso no controle do bicudo-do-algodoeiro (*Anthonomus grandis*). ENCONTRO DO TALENTO ESTUDANTIL, 9., 2004. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004b. p. 67.

OLIVEIRA NETO, O. B. et al. Optimization of the microinjection technique in cotton plant transformation cv Cedro. BRAZILIAN COTTON CONGRESS, 5, 2005. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2005. p. 06.

PRAY, C.E.; HUANG, J. The impact of *Bt* cotton in China. In: KALAITZANDONAKES, N. (Ed.). **The economic and environmental impacts of agbiotech: a global perspective**. New York: Kluwer-Plenum, 2003.

_____. ; _____. ; HU, R. ROZELLE. Five years of *Bt* cotton in China: the benefits continue. **Plant J.**, v.31, p.423-430. 2002.

QAIM, M.; JANVRY, A de. Genetically modified crops, corporate pricing strategies, and farmers' adoption: the case of *Bt* cotton in Argentina. **Am. J. Agr. Econ.**, v. 85, n.4, p.814-828. 2003.

_____. ; ZILBERMAN, D. Yield effects of genetically modified crops in developing countries. **Science**, v.299 p.900-902, 2003.

TOENNIESSEN G.H.; O'TOOLEY J.C.; DEVRIESZ J. Advances in plant biotechnology and its adoption in developing countries. **Current Opinion in Plant Biology**, v.6, p.191-198. [200-?].

WILKINS, T. A. ; ARPAT, A.B. The cotton fiber transcriptome. **Physiologia Plantarum**, v.124, n.295-300.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **20 questions on genetically modified (GM) foods**. [S.l.:s.n.], 2002. Disponível em: <<http://www.who.int/foodsafety/>"[http://www.who.int/foodsafety/ publications/biotech/en/20questions_en.pdf](http://www.who.int/foodsafety/publications/biotech/en/20questions_en.pdf)>. Acesso em: 16 mar. 2004.

WRIGHT, R.J. et al. D-subgenome bias of *Xcm* resistance genes in tetraploid *Gossypium* (Cotton) suggests that polyploid formation has created novel avenues for evolution. **Genetics**, v. 149, p.1987-1996, 1998.

Pesquisas Financiadas pelo FACUAL - Biotecnologia

- Determinação do fluxo gênico entre lavouras de algodão e entre lavouras de algodão e populações naturais de *Gossypium barbadense* visando fornecer subsídios para a liberação de cultivares transgênicas de algodão – 2002 e 2003 – Embrapa Algodão
- Estratégias moleculares para controle do bicudo-do-algodoeiro e de lepidópteros – 2003 - Embrapa/Cenargen
- Genética da resistência do algodoeiro à virose doença azul – 2002 e 2003 – Embrapa Algodão/Fundação Centro-Oeste
- Mapeamento molecular dos genes de resistência à doença azul do algodoeiro – 2002 e 2003 – Embrapa Algodão
- Identificação de marcadores moleculares fortemente ligados a gene(s) de resistência a *Xanthomonas axonopodis* pv. *malvacearum* em algodoeiro brasileiro – 2002 e 2003 – Fapeagro/lapar
- Transformação de genótipos de algodão com genes que sintetizam inibidores de proteases – 2003 – Embrapa Algodão/Fundaper
- Identificação, caracterização e disponibilização de estirpes de *Bacillus thuringiensis* eficazes ao controle de lepidópteros desfoliadores da cultura do algodão – 2003 – Embrapa/Cenargen.
- Obtenção de algodão transgênico resistente ao bicudo e lagartas da cotonicultura – 2004 – Fundação Centro-Oeste
- Isolamento de proteínas inseticidas em algodão – 2004 – Fundação Centro-Oeste
- Aplicação das técnicas de cultivo de tecidos na transformação genética do algodoeiro – 2004 – Fundação Centro-Oeste
- Obtenção de promotores específicos de fibra de algodão – 2004 – Fundação Centro-Oeste
- Estratégias moleculares para controle do bicudo-do-algodoeiro e de lepidópteros – 2004 – Embrapa/Cenargen
- Mapeamento da resistência do algodoeiro à mancha de ramulária (*Ramularia areola*) e variabilidade do patógeno no Estado do Mato Grosso – 2004 – Fundação Centro-Oeste
- Inventário de visitantes florais do algodão visando as avaliações de biossegurança de cultivares geneticamente modificadas – 2004 – Embrapa/Cenargen
- Desenvolvimento de bioinseticida a base de *Bacillus thuringiensis* para o controle de lepidópteros desfoliadores da cultura do algodão – 2004 – Embrapa/Cenargen